

О выборе технологии изготовления статора мелкосерийных и опытных электромеханических преобразователей энергии с учетом магнитных потерь

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ЛЬВОВ Н.Ю., ВАВИЛОВ В.Е., ЛЬВОВСКИЙ Т.А., БЕКУЗИН В.И.

Исследованы различные виды технологии изготовления магнитопроводов статора опытных электромеханических преобразователей энергии (лазерная резка, электроэрозионная резка). Дана оценка удельных потерь при частотах перемагничивания до 2000 Гц, исследования проведены как при термообработке образцов, так и без нее. Установлены перспективы использования каждого рассмотренного вида технологии и показана эффективность их использования. Показано, что термообработка позволяет обеспечить удельные потери в образцах, полученных с помощью лазерной резки, на уровне технических условий на используемый магнитомягкий материал. С увеличением частоты перемагничивания удельные потери в магнитопроводах, полученных с помощью электроэрозионной резки и без термообработки, становятся практически одинаковыми. Для исследуемого случая это наблюдается при 2000 Гц. Лазерная резка с термообработкой при условии соблюдения режимов резки является наиболее перспективной технологией изготовления магнитопроводов для микроэлектромеханических преобразователей энергии, а также для опытных образцов.

Ключевые слова: электромеханические преобразователи энергии, магнитопровод статора, технологии изготовления, лазерная резка, электроэрозионная резка, удельные потери

Одним из основных показателей, который необходимо достичь разработчикам электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) при создании новых изделий, является минимизация себестоимости изделия при сохранении его энергетических параметров. Достижение минимальной себестоимости обеспечивается с учетом программы выпуска изделий, их прогнозируемой потребности; необходимые показатели определяют технологии, применяемые для изготовления ЭМПЭ, и используемые материалы.

Для минимизации стоимости мелкосерийных и опытных изделий целесообразно применять новые технологии, которые при малых объемах производимой продукции требуют незначительных вложений на технологическую оснастку и перенастройку оборудования. В особенности это относится к изготовлению магнитопровода статора ЭМПЭ. При серийном его производстве используется штамповка, для которой требуется изготовление дорогостоящего штампа. Штамповка эффективна для серийных ЭМПЭ с программой выпуска нескольких тысяч штук и абсолютно нерентабельна для опытных ЭМПЭ, изготовление которых может потребовать изменения геометрии листа статора по результатам испытаний и, соответственно, геометрии штампа. Штамповка малоэффективна и для ЭМПЭ с программой выпуска нескольких штук в год и микро-ЭМПЭ ввиду малых геометрических размеров их

магнитопровода. Для опытных ЭМПЭ, микроЭМПЭ и мелкосерийных ЭМПЭ целесообразно применять электроэрозионную или лазерную резку листов магнитопроводов статора.

Особенности применения данных технологий рассмотрены в [1–3]. В этих работах доказана экономическая эффективность лазерной и электроэрозионной резки при создании опытных образцов и микроЭМПЭ, но при этом практически не даются технические рекомендации по использованию этих технологий, расчету потерь в листах магнитопровода статора при электроэрозионной резке и лазерной резке, не приводится сравнение данных технологий. Между тем очевидно, что изменение технологии изготовления листов магнитопровода статора приведет к изменению характеристик магнитомягкого материала. Это показано в работах [4–6], посвященных изменению удельных потерь в магнитопроводе статора при лазерной резке и электроэрозии; при этом в своем большинстве результаты [4–6] получены только для частоты 50 Гц и электротехнических сталей зарубежного производства. Важно также отметить, что в [4–6] в основном рассматривается лазерная резка и отмечается, что полученные характеристики материалов зависят от типа станка и режима лазерной резки.

Целью представленной работы являются исследования технологий электроэрозионной и лазерной резки для производства магнитопроводов статора

из электротехнических сталей отечественного производства. Даются сравнение технологий и оценка характеристик магнитопроводов ЭМПЭ, выполненных по данным технологиям не только при частотах до 50 Гц, но и до 2000 Гц (что особенно важно для высоко- и сверхвысокооборотных ЭМПЭ). Исследования проводятся на образцах без термообработки (ТО) и с термообработкой.

Методология исследований и используемые экспериментальные образцы. Для проведения экспериментальных исследований специалистами Уфимского государственного авиационного технологического университета и «НПО «Интротест» (Екатеринбург) была проведена глубокая модернизация серийной магнитоизмерительной установки МК-4Э, что позволило измерять удельные потери в магнитомягких образцах кольцевой формы на частотах перемагничивания до 2000 Гц (ранее только до 400 Гц); установка прошла сертификацию и поверку. Экспериментальные исследования выполнялись при синусоидальном перемагничивании образцов, в широком диапазоне значений индукции (в том числе и при значениях насыщения), при частотах 400, 1000, 2000 Гц и комнатной температуре (25 °С, относительная влажность воздуха 25%).

Принцип работы модернизированной установки МК-4Э заключается в перемагничивании кольцевого образца из магнитомягкого материала, на котором располагаются две обмотки: измерительная и силовая. Перемагничивание осуществляется по динамической петле гистерезиса при частотах 50–2000 Гц, напряжение на силовой обмотке считается заданным. В результате измерений регистрируются магнитные петли гистерезиса и определяются удельные потери методом ваттметра (согласно ГОСТ 12119.4-98).

Определение удельных магнитных потерь данным методом основано на измерении активной мощности, расходуемой на перемагничивание образца и потребляемой измерительными приборами (ваттметрами и вольтметрами) и цепью обратной связи усилителя. Активная мощность определяется косвенным методом по напряжению на обмотке исследуемого образца. Определение действующего значения напряженности магнитного поля основано на измерении намагничивающего тока.

При этом удельные потери кольцевого образца

$$P_{\text{уд}} = \frac{1}{m} \left(\frac{w_1}{w_2} P_M - \frac{U_1^2}{r_3} \right) \left(1 + \frac{r_2}{r_3} \right),$$

где m — масса образца; w_1 — число витков в силовой (намагничивающей) обмотке; w_2 — число вит-

ков в измерительной обмотке; P_M — среднее значение активной мощности; U_1 — действующее значение напряжения; r_2 — суммарное сопротивление измерительной обмотки образца, Ом; r_3 — эквивалентное сопротивление приборов и устройств, соединенных с измерительной обмоткой образца.

Погрешность измерения данным методом согласно ГОСТ 12119.4-98 не должна превышать 2,5%.

Объектом исследований в работе являются кольцевые образцы из электротехнической стали 2421 толщиной листа 0,18 мм, также рассматривались образцы толщиной 0,27 и 0,35 мм. Геометрические размеры исследуемых образцов приведены на рис. 1. Для измерений на образцах уложено 56 витков измерительной обмотки и 5 витков обмотки намагничивания. Резка образцов выполнялась на лазерном станке Laser Cut FO Professional на основе волоконного лазера IPG Photonics. Эрозионная резка выполнялась на станке DK 7725. При исследованиях рассматривались образцы с ТО после резки и без нее. Термообработка проводилась по методике ТУ 14-1-4657-89 до температуры 800 °С.

Результаты экспериментов. В результате экспериментов были получены зависимости удельных потерь от индукции и частоты перемагничивания, которые с помощью интерполяции преобразованы в семейство кривых, характеризующих удельные потери и кривые намагничивания стали 2421 при различных значениях частоты и технологиях обработки листов. На рис. 2,а приведены кривые намагничивания стали 2421 при лазерной резке (ЛР) с термообработкой (ТО) и без нее, а также кривая намагничивания для стали 2421, приведенная в технических условиях. На рис. 2,б представлена кривая намагничивания для эрозионной резки (ЭР) с ТО и без нее.

Интерполяция зависимости удельных потерь потребовалась, поскольку при экспериментальных исследованиях возникли трудности с обеспечением одинаковых значений намагничивающей индукции образцов. Результаты измерений по точкам приведены в табл. 1 и 2.

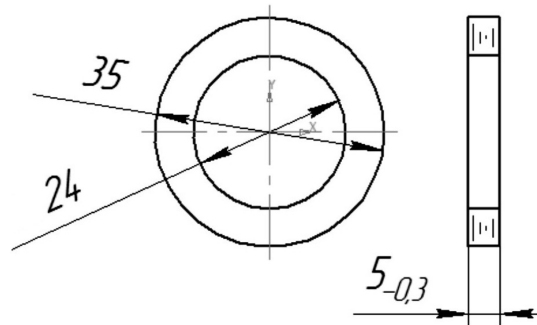


Рис. 1. Геометрические размеры исследуемого образца и станок (схематически) для лазерной резки

Таблица 1

Результаты измерений образцов после ЭР и ЛР без ТО

Лазерная резка при частотах (Гц), значения показателей					
50		400		2000	
<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг
0,15	0,1134	0,18	1,488	0,19	12,657
0,5835	1,047	0,5364	9,3	0,46	59,59
0,81	1,673	0,8	16,82	0,7361	126,3
1,12	2,452	1,072	25,24	0,91	181,28
1,453	3,728	1,412	39,47	1,1	240
1,481	3,798	1,488	44,16	1,282	312,5
1,516	3,824	1,545	45,38	1,458	402
1,54	4,178	1,563	49,27	1,546	439,9
Эррозийная резка при частотах (Гц), значения показателей					
50		400		2000	
<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг
0,18	0,08	0,2491	1,437	0,2567	12,72
0,41	0,3287	0,33	2,396	0,3406	21,38
0,58	0,59	0,49	4,87	0,4256	32,02
0,88	1,208	0,83	11,63	0,511	44,46
1,17	1,98	1,083	18,68	0,596	58,58
1,437	2,98	1,251	24,09	0,8545	110,6
1,532	3,39	1,413	30,99	1,023	154,1
1,55	3,375	1,556	36,53	1,366	267

Таблица 2

Результаты измерений образцов после ЭР и ЛР с ТО

Лазерная резка при частотах (Гц), значения показателей									
50		400		800		1000		2000	
<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг
0,14	0,034	0,4	3,048	0,175	1,442	0,254	4,001	0,46	34,69
0,21	0,067	0,715	7,135	0,363	5,479	0,471	12,34	0,54	47,02
0,65	0,45	0,89	10,63	0,496	9,772	0,796	31,94	0,64	62,15
0,97	0,94	0,98	12,66	0,882	27,61	1,130	60,74	0,73	79,58
1,267	1,646	1,029	13,78	1,128	44,14	1,251	75,51	0,82	98,94
1,387	2,066	1,12	16,3	1,265	56,01	1,341	93,17	0,91	121,1
1,43	2,257	1,209	19,04	1,400	70,41	1,445	104,0	1	144,1
1,466	2,541	1,297	22,53	1,484	81,48	1,544	130,3	1,1	170,9
Эррозийная резка при частотах (Гц), значения показателей									
50		400		800		1000		2000	
<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг	<i>V</i> , Тл	<i>P</i> , Вт/кг
0,14	0,034	0,44	3,048	0,363	5,479	0,471	12,34	0,46	34,69
0,21	0,067	0,715	7,135	0,633	15,11	0,581	17,98	0,54	47,02
0,97	0,94	0,98	12,66	0,882	27,61	0,687	24,30	0,82	98,94
1,267	1,646	1,029	13,78	0,947	31,64	1,130	60,74	0,91	121,1
1,387	2,066	1,12	16,3	1,128	44,14	1,251	75,51	1,1	170,9
1,43	2,257	1,209	19,04	1,265	56,01	1,341	93,17	1,28	232,9
1,473	2,759	1,496	31,63	1,484	81,48	1,445	104,0	1,45	346,1
1,542	2,758	1,554	36,45	1,537	83,48	1,544	130,3	1,55	352,6

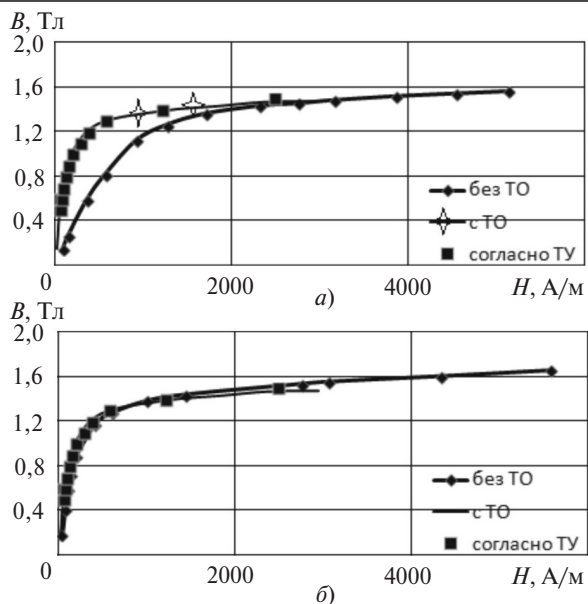


Рис. 2. Кривые намагничивания электротехнической стали 2421 при различных технологиях изготовления листов с последующей ТО или без нее: *а* – лазерная резка; *б* – эрозионная резка

Экспериментальные данные показывают, что при лазерной резке без термообработки кривая намагничивания в области рабочих индукций $0,5 \div 1,4$ Тл имеет более высокие значения напряженности магнитного поля по сравнению с кривой намагничивания, представленной в технических условиях, петля гистерезиса образца после ЛР значительно изменяется без ТО.

Были получены петли гистерезиса образцов после лазерной резки с термообработкой и без нее. Результат говорит о том, что после лазерной резки листы статора необходимо подвергать термообработке согласно техническим условиям (ТУ). В противном случае характеристики магнитомягких материалов будут значительно хуже. Аналогичные результаты были получены для электротехнической стали 2421 толщиной 0,27 и 0,35 мм. Анализ кривых намагничивания образцов, полученных с помощью ЭО, показывает, что они практически не изменяются по сравнению с кривой, приведенной в ТУ, расхождение не более 5%. При этом образцы с ТО и без ТО имеют аналогичные характеристики. В первом приближении это позволяет сделать вывод о том, что образцы после ЭО не нужно подвергать термообработке. Для подтверждения данного тезиса были проведены детальные исследования удельных потерь в образцах после ЛР и ЭО.

На рис. 3 представлены результаты исследования удельных потерь в кольцевом магнитопроводе при частоте 50 Гц. Магнитопроводы выполнялись с помощью ЛР и ЭО с термообработкой и без нее, толщина листа исследуемых образцов составляла 0,18 мм.

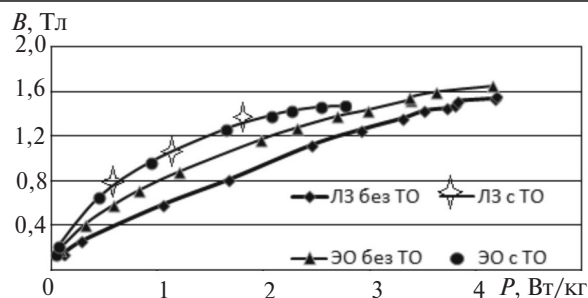


Рис. 3. Удельные потери электротехнической стали 2421 (толщина листа 0,18 мм) при частоте 50 Гц и различных технологиях изготовления листов с последующей ТО или без нее

Из рис. 3 видно, что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл удельные потери составляют 2,4 Вт/кг, при этом термообработка согласно ТУ позволяет снизить данные потери в два раза. При ЭО удельные потери при частоте 50 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 1,9 Вт/кг, при этом ТО позволяет их также снизить до 1,4 Вт/кг (на 36,8%). Таким образом, в образцах, полученных с помощью ЛР без ТО, удельные потери на 20% больше по сравнению с образцами, полученными с помощью ЭО без ТО. При этом ТО позволяет обеспечить удельные потери как в образцах, полученных с помощью ЭО, так и в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, разница составляет не более 5%. Результаты показывают, что и при ЛР, и при ЭО необходимо делать ТО образцов, что обеспечивает свойства образцов на уровне данных в ТУ. Полученные результаты доказывают перспективность использования лазерной резки электротехнической стали.

Из рис. 4 видно, что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл и частоте 400 Гц удельные потери составляют 33 Вт/кг, их увеличение по сравнению с частотой 50 Гц происходит в 13,75 раза. При этом термообработка согласно ТУ позволяет снизить эти потери до 19 Вт/кг. Важно отметить, что после ТО удельные потери при 400 Гц и индукции 1 Тл соответствуют ТУ на сталь электротехническую 2421 толщиной листа 0,18 мм (14 Вт/кг). При ЭО удельные потери при частоте 400 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 22 Вт/кг, при этом ТО позволяет их также снизить до 19 Вт/кг (на 14%).

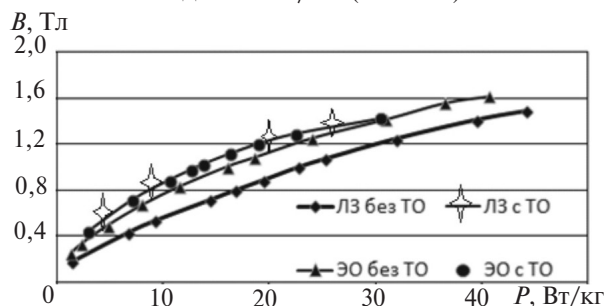


Рис. 4. Удельные потери электротехнической стали 2421 (толщина листа 0,18 мм) при частоте 400 Гц и различных технологиях изготовления листов с последующей ТО или без нее

Таким образом, в образцах, полученных с помощью ЛР без ТО, удельные потери на 33% больше по сравнению с образцами, полученными с помощью ЭО без ТО. Можно отметить увеличенную разность значений потерь между образцами ЛР и ЭО без ТО по сравнению с частотой 50 Гц. При этом ТО позволяет обеспечить значения удельных потерь как в образцах, полученных с помощью ЭО, так и в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, разница не более 5%. Кроме того, при увеличении частоты перемагничивания разница между удельными потерями в образцах, полученных с помощью ЭО без ТО и с ТО, снижается. Для частоты 50 Гц она составляла 36,8%, а при 400 Гц — 14%.

На рис. 5 приведены удельные потери для частоты 2000 Гц. Из рис. 5 видно, что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл и частоте 2000 Гц удельные потери составляют 280 Вт/кг, их увеличение по сравнению с частотой 50 Гц происходит в 116,6 раз. При этом термообработка согласно ТУ позволяет снизить эти потери до 210 Вт/кг (на 25%). При ЭО удельные потери при частоте 2000 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 210 Вт/кг; важно отметить, что у образца, полученного с помощью ЭО с ТО и без нее, потери одинаковые. Таким образом, в образцах, полученных с помощью ЛР без ТО, удельные потери на 25% больше по сравнению с образцами, полученными с помощью ЭО без ТО, с ТО, а также в образцах, полученных с помощью ЛР и ТО. При этом ТО позволяет обеспечить удельные потери как в образцах, полученных с помощью ЭО, так и в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, разница не более 5%. Кроме того, при увеличении частоты перемагничивания до 2000 Гц разница между удельными потерями в образцах, полученных с помощью ЭО без ТО и с ней, отсутствует. Таким образом, в области высоких частот для исследуемого случая частоты 2000 Гц и более образцы после ЭО можно не подвергать ТО. В подтверждение данного вывода на рис. 6 приведена кривая намагничивания, полученная для образца ЭО при 2000 Гц, которая показывает, что у образцов с ТО и без нее кривые намагничивания совпадают.

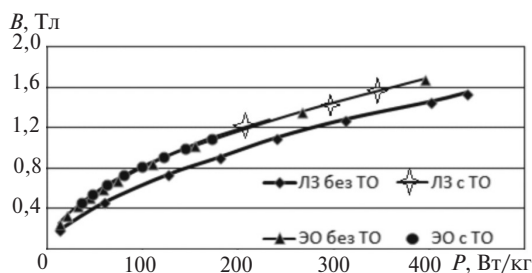


Рис. 5. Удельные потери электротехнической стали 2421 (толщина листа 0,18 мм) при частоте 2000 Гц и различных технологиях изготовления листов с последующей ТО или без нее

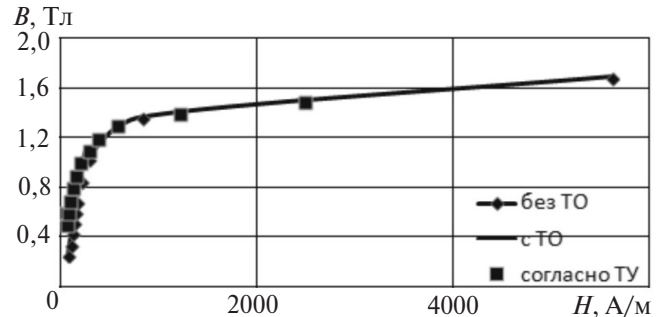


Рис. 6. Кривые намагничивания электротехнической стали 2421 при ЭО и частоте 2000 Гц с последующей ТО или без нее

Результаты исследований показали, что использование ТО позволяет обеспечить характеристики магнитомягких материалов (кривые намагничивания, удельные потери) после ЛР и ЭО на одинаковом уровне, который соответствует ТУ на исследуемую электротехническую сталь.

Сравнение технологии ЭО и ЛР при разработке магнитопроводов. Исследования показали, что применение ТО позволяет обеспечить для магнитопроводов, полученных с помощью ЛР и ЭО, одинаковые значения потерь. Представляется целесообразным сравнить эти технологии по другим критериям. Результаты сравнения приведены в табл. 3. Сравнение выполнялось для вентильного электродвигателя с постоянными магнитами частотой 400 Гц и мощностью 80 Вт, материал магнитопровода сталь 2421 толщиной листа 0,18 мм (см. рис. 7).

Большой недостаток ЭО заключается в необходимости при изготовлении магнитопровода охлаждать образец водой, что приводит к коррозии материала. Важно отметить, что погружение после ЭО в керосин или масло не предотвращает развития коррозии. Также процесс ЭО более трудоемок, что связано с подготовкой образца в единый монолитный блок. При ЛР данная операция не требуется, так как ЛР обеспечивает перемещение по всей ленте и вырезку листов (рис. 8).

Недостаток ЛР — размерный припуск на лазерную резку и наличие нагаров, которые требуют дополнительной механической обработки, например на гратосъемных станках. Кроме того, при ошибочных режимах резки магнитомягкий материал может подвергаться дополнительным нагарам (рис. 8), что ухудшает его свойства. Стоимость изготовления магнитопроводов при применении обеих технологий одинаковая.

В целом ЛР с ТО при условии соблюдения режимов резки является более перспективной технологией изготовления магнитопроводов для микро-ЭМПЭ, а также для опытных образцов. Именно поэтому данная технология используется для изготовления опытных образцов ЭМПЭ мощностью от

Сравнение различных технологий изготовления магнитопроводов

Сравниваемые результаты	Технологии		
	ЛР	ЭО	Механическая штамповка
Удельные потери без ТО, Вт/кг	30	22	22
Удельные потери с ТО, Вт/кг	18	18	18,5
Стоимость магнитопровода, руб.	3000 (по данным группы компании «Фодес»)	3000 (по данным группы компании «Фодес»)	Оценка может сделана только при наличии программы выпуска
Подверженность коррозии	Нет	Да	Нет
Необходимость дополнительной механической обработки	В зависимости от режима резки	Нет	Да
Трудоемкость, %	30	60	30

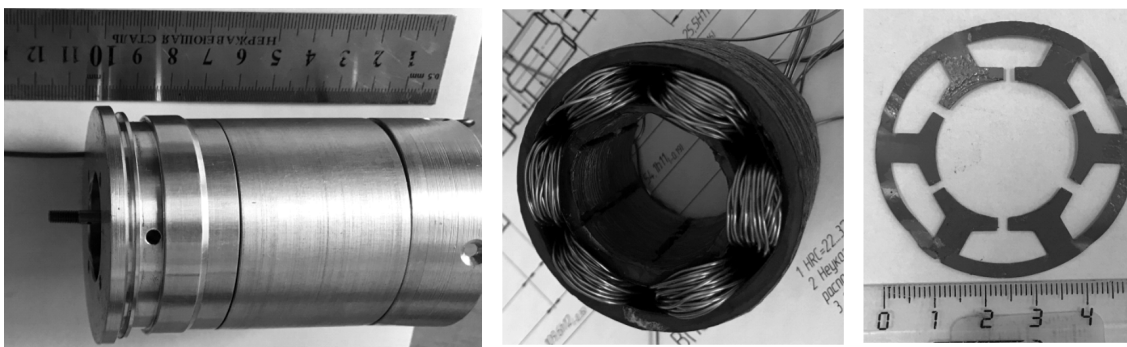


Рис. 7. Вентильный электродвигатель (80 Вт, 6500 об/мин) с магнитопроводом, полученным с помощью лазерной резки (слева); магнитопровод статора (в центре) и лист магнитопровода после ЛР (справа)

40 до 120 кВт при значениях частоты вращения ротора до 6000 об/мин.

Желательные направления дальнейших исследований — сравнение различных станков для лазерной резки и оценка изменения магнитомягких материалов в зависимости от типа станка, а также проведение детальных исследований изменения структуры образцов при лазерной резке без ТО для определения причин ухудшения параметров стали.

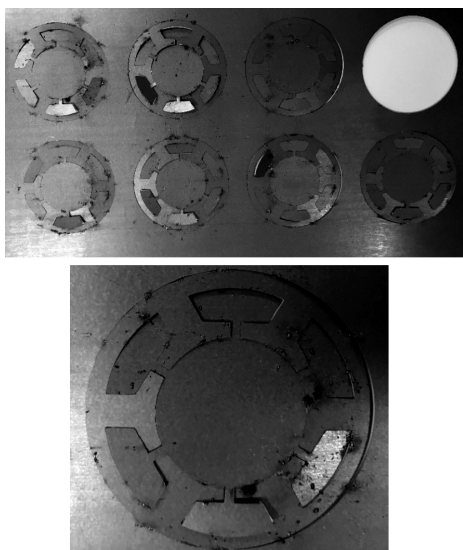


Рис. 8. Лента электротехнической стали после ЛР и прожиги при неверном выборе режимов лазерной резки

Работа была выполнена по проектной части государственного задания 8.1277.2017/ПЧ «Исследования, разработка и внедрение перспективных электрохимических преобразователей для автономных объектов с гибридной силовой установкой».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dickmann K. Influence of the laser cutting process on the magnetic properties of electrical sheets. — *Anales de Fisica*, 1990, vol. 86 pp. 33–45.
2. Belhadj A., Houbaert Y., De Wulf M., Depret D., Breaban F. Effect of laser cutting on microstructure and magnetic properties of nonoriented electrical steels. — *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 256, pp. 20–31.
3. Schoppa A., Schneider J., Wuppermann C.D. Influence of manufacturing processes on the magnetic properties of N.O. electrical steels. — *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, vol. 215/216, pp. 74–78.
4. Belhadja A., Baudouin P., Breaban F., Deffontaine A., Dewulf M., Houbaert Y. Effect of laser cutting on microstructure and on magnetic properties of grain non-oriented electrical steels. — *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 256 pp. 20–31.
5. Loisos G., Anthony J. Effect of mechanical and Nd: YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels. — *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 161 pp. 151–155.
6. Buluh T., Ljubenskó E., Napla M., Ondrušek I., Schneeweis O. Magnetic Properties and Structure of Non-Oriented Electrical Steel Sheets after Different Shape Processing. — *Acta Physica Polonica*, vol. 131, pp. 819–821.

А в т о р ы: **Исмагилов Флюр Рашитович** окончил Уфимский авиационный институт в 1973 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Электромеханические элементы систем управления со сложной геометрией подвижной части». Заведующий кафедрой «Электромеханика» Уфимского государственного авиационно-технологического университета (УГАТУ).

Львов Николай Юрьевич окончил Московский политехнический университет в 2014 г. Начальник Отдела перспективных разработок АО «ОКБ Кристалл».

Вавилов Вячеслав Евгеньевич окончил УГАТУ в 2010 г. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гибридные магнитные подшипники и их системы управления (исследования и разработка)». Доцент кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Львовский Тимофей Александрович окончил Московский политехнический университет в 2014 г. Инженер I категории АО «ОКБ Кристалл».

Бекузин Владимир Игоревич окончил УГАТУ в 2016 г. Аспирант кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Elektrichestvo, 2019, No. 4, pp. 44–50

DOI:10.24160/0013-5380-2019-4-44-50

On Selecting the Technology for Manufacturing the Stator of Low-Batch and Pilot Electromechanical Power Converters Taking Magnetic Losses into Account

ISMAGILOV Flyur R. (*Ufa State Aviation-Technological University – USATU, Ufa, Russia*) – Head of Department of Electromechanics, Dr. Sci. (Eng.)

L'VOV Nikolay Yu. (*Joint Stock Company (JSC) «OKB Kristall», Moscow, Russia*) – Head of Advanced Development Department, Cand. Sci. (Eng.)

VAVILOV Vyacheslav Ye. (*USATU, Ufa, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

L'VOVSKIY Timofey A. (*JSC «OKB Kristall», Moscow, Russia*) – 1st Category Engineer

BEKUZIN Vladimir I. (*USATU, Ufa, Russia*) – Graduate Student

Various technologies for manufacturing the stator cores for pilot electromechanical power converters (laser and electroerosion cutting) are considered. Specific losses at re-magnetization frequencies up to 2000 Hz are estimated. The investigations were carried out with and without subjecting the samples to thermal treatment. Prospects for using each of the considered technologies are established, and the effectiveness of using them is shown. It is shown that the use of the re-magnetization makes it possible to have specific losses in the samples obtained by means of laser cutting at the level of specifications for the used magnetically soft material. With a given re-magnetization frequency, the specific losses in the cores obtained by means of electroerosion cutting and without thermal treatment become almost identical with each other. For the studied case, this is observed at 2000 Hz. Laser cutting with the re-magnetization is the most promising technology of manufacturing cores for microelectromechanical power converters and for pilot samples provided that the specified cutting conditions are fulfilled.

Key words: *electromechanical power converters, stator core, manufacturing technologies, laser cutting, electroerosion cutting, specific losses*

REFERENCES

1. **Dickmann K.** Influence of the laser cutting process on the magnetic properties of electrical sheets. — *Anales de Fisica*, 1990, vol. 86 pp. 33–45.
2. **Belhadj A., Houbaert Y., De Wulf M., Depret D., Breaban F.** Effect of laser cutting on microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steels. — *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 256, pp. 20–31.
3. **Schoppa A., Schneider J., Wuppermann C.D.** Influence of manufacturing processes on the magnetic properties of N.O. electrical steels. — *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, vol. 215/216, pp. 74–78.
4. **Belhadja A., Baudouin P., Breaban F., Deffontaine A., Dewulf M., Houbaert Y.** Effect of laser cutting on microstructure

and on magnetic properties of grain non-oriented electrical steels. — *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, vol. 256 pp. 20–31.

5. **Loisos G., Anthony J.** Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels. — *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 161 pp. 151–155.

6. **Bulín T., Švábenská E., Hapla M., Ondrůšek Ě., Schneeweis O.** Magnetic Properties and Structure of Non-Oriented Electrical Steel Sheets after Different Shape Processing. — *Acta Physica Polonica*, vol. 131, pp. 819–821.

[06.11.2018]